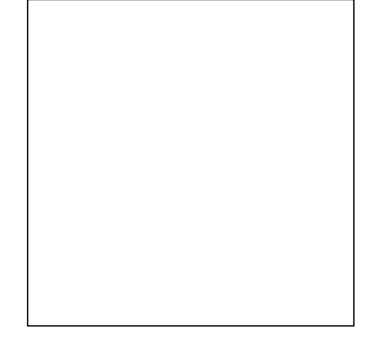
В российских высоковольтных сетях в настоящее время происходит замена индукционных счетчиков электроэнергии на микропроцессорные. В сетях 110 кВ и выше такая замена производится достаточно безболезненно, но в сетях 6–10–35 кВ встретились трудности, вызванные неполной совместимостью счетчиков нового поколения с некоторыми типами трансформаторов напряжения, находящихся в эксплуатации.

Михаил Хаимович Зихерман приглашает всех специалистов, занятых в области учета электроэнергии, присоединиться к обсуждению этой проблемы и выразить свое отношение к предлагаемым им в своем материале решениям.



ТРЕХФАЗНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Проблема совместимости элементов

Михаил Зихерман,
ведущий научный сотрудник,
Филиал ОАО
«НТЦ электроэнергетики» –
ВНИИЭ, г. Москва

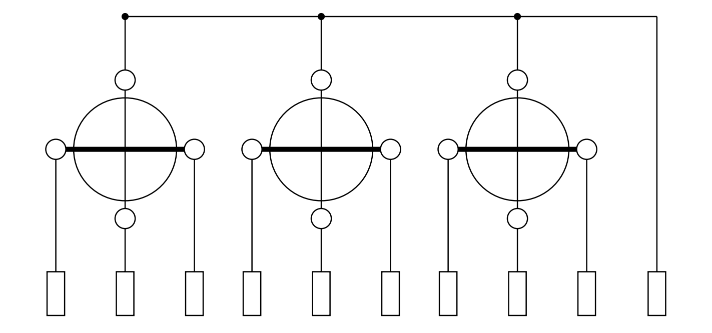
Новые счетчики являются трехэлементными (рис. 1), то есть их микропроцессор в цифровом виде умножает три вектора фазных токов на три вектора соответствующих фазных напряжений и результаты складывает во времени. Перед микропроцессором установлен аналого-цифровой преобразователь с номинальным фазным напряжением 57,7 В и номинальным током 1 или 5 А. К нему от вторичной обмотки трансформатора напряжения (ТН) подводятся три фазы и нуль, а от трансформаторов тока – три фазных тока. Для расчета активной энергии берется скалярное произведение векторов, а для расчета реактивной – векторное.

Основная задача коммерческого учета – обеспечить необходимую точность в условиях всякого рода несимметрии по фазам. Если бы ее не было, можно было бы учесть энергию только одной фазы и результат умножить на три. В реальности несимметрия всегда присутствует, поскольку она вызвана рядом причин. Это прежде всего неравенство нагрузок по фазам, неполная транспозиция проводов линий электропередачи, повреждения изоляции, феррорезонансы и т.п.

Энергосистемы пытаются снизить несимметрию путем соединения обмоток силовых трансформаторов в замкнутый треугольник или в зигзаг. Этому же способствует применение симметрирующих трансформаторов и трансформаторов с трехстержневым магнитопроводом. Улучшается транспозиция проводов и равномерность нагрузки. В результате в высоковольтных сетях основную часть времени несимметрия не превышает 3%, но с ней необходимо считаться, особенно при коммерческом учете электроэнергии с классом точности 0,5 и выше. Не хотелось бы терять точность и в остальное время.

В трехфазных сетях несимметрия проявляется в неравенстве величин напряжений и токов по фазам, а также в отклонении угла между ними от 120°. Ей подвержены как токи, так и междуфазные и фазные напряжения.

• **Рис. 1** Схема входных цепей микропроцессорного счетчика



ЧЕТЫРЕХ- И ТРЕХПРОВОДНЫЕ СЕТИ

Высоковольтные абонентские трансформаторы обладают большим разнообразием в обустройстве нейтрали первичных обмоток, а при их соединении в треугольник ее вообще нет. При соединении в звезду или в зигзаг она имеется, но не всегда выведена наружу. Выведенная нейтраль может либо заземляться, либо оставаться изолированной от земли. Система с глухо заземленной нейтралью называется четырехпроводной, а в остальных случаях – трехпроводной. Различие в режиме заземления нейтрали изменяет работу всей сети, в том числе и устройств учета электроэнергии.

В четырехпроводных высоковольтных сетях (110 кВ и выше) фазные напряжения абонента задаются энергосистемой. Их измеряют тремя трансформаторами напряжения с заземленной нейтралью первичных обмоток, а фазные токи – тремя трансформаторами тока. Счетчик учитывает всю энергию, поступающую по четырем проводам, включая провод заземления. В этих сетях наблюдается полная совместимость всех элементов измерительного комплекса.

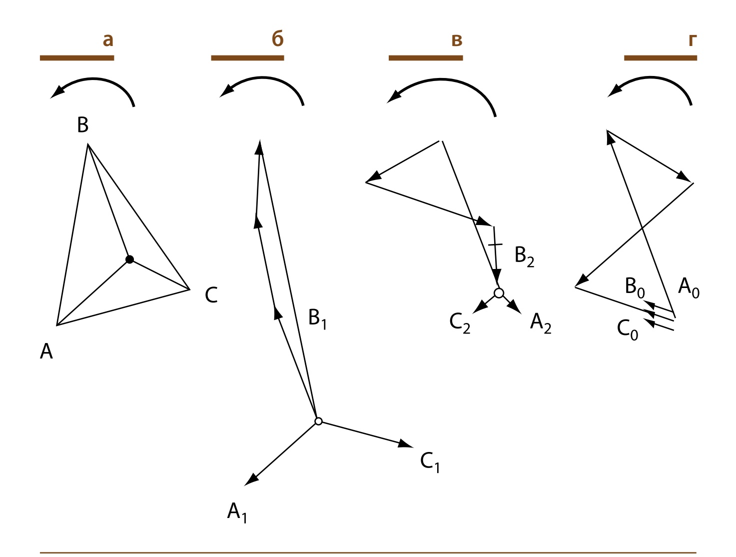
В трехпроводных сетях (6–10–35 кВ) четвертый провод (глухое заземление нейтрали у абонентских трансформаторов) отсутствует. Энергосистема задает только три междуфазных напряжения. Фазные токи и напряжения (фаза – нейтраль силового трансформатора) формируются самим абонентом со своей степенью несимметрии, зависящей от неравенства его нагрузок по фазам.

Новый счетчик, требующий трех фазных токов и трех фазных напряжений, при попытке учесть энергию у такого абонента оказывается в сложной ситуации, так как нейтраль и фазные напряжения силового трансформатора недоступны. Кроме того, при групповом учете не ясно, фазные напряжения какого из нескольких абонентов надо бы подать на счетчик.

Чтобы не сталкиваться с такими трудностями, специально для трехпроводной сети 6–10–35 кВ в прежние времена выпускались двухэлементные индукционные счетчики активной энергии. Они требовали только двух фазных токов и двух междуфазных напряжений. Фазные напряжения не использовались, а третий фазный ток находился как сумма токов других фаз, взятая с обратным знаком. Для организации учета было достаточно двух трансформаторов тока и двух междуфазных трансформаторов напряжения. Такой способ учета оказался возможным благодаря равенству нулю суммы трех фазных токов и трех междуфазных напряжений.

Установленные в этих сетях измерительные трансформаторы были приспособлены для питания двухэлементных счетчиков, и применять их для питания новых трехэлементных счетчиков без предварительной проверки на совместимость нельзя.

Пример разложения исходных векторов (а) на симметричные составляющие прямой (б), обратной (в) и нулевой (г) последовательностей **Рис. 2**



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Оценить возможности совместной работы всех элементов трехфазного измерительного комплекса помогает анализ с помощью симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для этого исходные векторы токов и напряжений нужно разложить на три составляющие. Три фазных вектора прямой последовательности имеют один размер и сдвинуты на 120° при прямом чередовании фаз. Три фазных вектора обратной последовательности аналогичны, но имеют обратное чередование. Три фазных вектора нулевой последовательности тоже имеют одинаковый размер, но направлены в одну сторону. Все векторы вращаются против часовой стрелки с частотой 50 Гц. Наличие составляющих обратной и нулевой последовательностей говорит о несимметрии исходных векторов.

Задача разложения исходных векторов на составляющие заключается в нахождении размеров векторов каждой последовательности и их взаимного расположения. Разложение следует начинать с выбора фазы, вектор которой принимается за линию нулевого угла и его не следует поворачивать. Составляющая прямой последовательности выбранной фазы определяется как треть от геометрической суммы исходных векторов трех фаз, два из которых нужно повернуть на 120°. Вектор отстающей фазы следует повернуть против часовой стрелки, а вектор опережающей – по часовой. Составляющая обратной последовательности определяется подобным образом, только при повороте исходные векторы нужно поменять местами. Для определения составляющей нулевой последовательности исходные векторы трех фаз нужно геометрически сложить без поворота, а сумму разделить на три.

Пример такого разложения дан на рис 2. За линию нулевого угла принят вектор фазы B. Для нахождения вектора B_1 прямой последовательности нужно геометрически сложить три вектора: исходный вектор B, повернутый на 120° по часовой стрелке исходный вектор A и повернутый на 120° против часовой стрелки исходный вектор C. Для нахождения вектора B_2 обратной последовательности нужно геометрически сложить три вектора: исходный вектор B, повернутый на 120° против часовой стрелки исходный вектор A и повернутый на 120° по часовой стрелке исходный вектор C. Вектор B_0 нулевой последовательности находится как геометрическая сумма всех исходных векторов. Все полученные векторы нужно разделить на три. Для нахождения векторов фазы A в прямой, обратной и нулевой последовательностях полученные векторы B_1, B_2 и B_0 нужно повернуть по часовой стрелке на 240°, 120° и 0° соответственно, а фазы C – на 120°, 240° и 0°.

Для нахождения трехфазной мощности абонента через симметричные составляющие нужно пофазно перемножить

симметричные составляющие фазных токов и напряжений отдельно в каждой последовательности, а результаты сложить. Перемножать токи и напряжения разноименных последовательностей не имеет смысла, т.к. в итоге всегда получится нуль.

В сетях 6–10–35 кВ фазные напряжения абонента, наряду с прямой и обратной, могут содержать нулевую последовательность. Если бы она содержалась и в фазных токах, их произведение внесло бы свой вклад в результирующую мощность. В трехпроводной системе нулевая последовательность в фазных токах всегда отсутствует и своего вклада в результирующую мощность эта последовательность никогда не вносит. То есть в сетях 6–10–35 кВ по земляному (нулевому) каналу энергия не распространяется.

Осознание этого очевидного факта позволяет в этих сетях отказаться от фазных напряжений отдельных абонентов и подавать на счетчик любые фазные напряжения, в т.ч. и напряжения отдельных фаз сети относительно земли. В большинстве случаев их можно легко получить от заземляемых трансформаторов напряжения, установленных на шинах распредустройств для контроля изоляции сети. Это особенно удобно при групповом учете электроэнергии по отходящим фидерам, питающим одновременно нескольких абонентов, когда их фазные напряжения не только различны, но и недоступны.

ОГРАНИЧЕНИЯ ДВОЙНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ТН

Одновременное использование фазных напряжений сети для учета и контроля изоляции наряду с достоинствами имеет недостатки. Связаны они с возможностью появления больших напряжений нулевой последовательности в фазных напряжениях сети, что ограничивает их двойное применение.

Первое ограничение накладывает аналого-цифровой преобразователь, который выходит из заявленного класса точности при отклонении входного фазного напряжения сверх 20% от номинального значения (57,7 В). Кроме того, при трехкратных повышениях фазных напряжений при феррорезонансе, под угрозой оказывается термическая стойкость преобразователя.

Второе ограничение могут накладывать заземляемые трансформаторы напряжения контроля изоляции, вторичные фазные напряжения которых тоже могут выходить из заявленного класса точности при их отклонении сверх 20% от номинального значения.

Отклонение фазных напряжений в сетях 6–10–35 кВ сверх 20% от номинальных значений обычно вызывается увеличением доли напряжения нулевой последовательности, то есть смещением нейтрали относительно центра треугольника междуфазных напряжений. Наиболее часто это происходит при однофазных замыканиях сети на землю. Напряжение на поврежденной фазе снижается до нуля, а на двух других возрастает до междуфазного, то есть нулевая последовательность достигает 100% от номинального фазного напряжения. Замыкание на землю может продолжаться часами или даже сутками, и всё это время система учета электроэнергии вынуждена работать вне заявленного класса точности. Можно либо мириться с этим, либо искать другие технические решения.

НЕОБХОДИМЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Для учета электроэнергии в трехпроводных сетях лучше всего использовать фазные напряжения, полностью лишенные нулевой последовательности. Получить их можно от незаземляемых трехфазных ТН с изолированной нейтралью первичной обмотки. Такие трансформаторы типа НТМК-10(6) выпускались с 1937 по 1987 гг. Они имели трехстержневой магнитопровод и выведенный нуль звезды вторичной обмотки. Контролировать изоляцию они не могли и были сняты с производства.

Если ограничиться задачей питания цепей учета, то можно было бы возобновить производство подобных ТН. Но тогда для них пришлось бы выделять вторую ячейку распредустройства, так как первая уже занята трансформатором напряжения, контролирующим изоляцию сети и питающим цепи релейной защиты, автоматики и телеизмерений. Такое решение нецелесообразно с экономической точки зрения.

Необходимо стремиться к такой конструкции трансформатора, которая позволяла бы совместить все необходимые функции в одном изделии и установить его в одной ячейке. Функцию питания счетчиков следует поручить отдельной обмотке, фазные напряжения которой не содержат нулевой последовательности, а ее выводы разместить в отдельной коробке. Функцию питания релейной защиты и контроля изоляции можно оставить в традиционном виде. Такой трансформатор типа НАБИСТ-6(10) уже разработан для сетей 6–10 кВ [1]. Скоро должны появиться и другие разработки, и постепенно все старые трансформаторы напряжения заменят на новые.

Массовая замена трансформаторов напряжения в сетях 6–35 кВ требует времени и значительных средств. Конечно, такую работу нужно проводить, но одновременно следует стремиться к использованию уже установленных трансформаторов напряжения без потери точности учета и без риска повреждения счетчиков. Для этого нужно провести несколько научно-исследовательских работ.

Подавляющее большинство установленных в сети трансформаторов напряжения формируют треугольник междуфазных напряжений, который имеет два важных для целей учета свойства – отсутствие нулевой последовательности и высокий класс точности. Осталось только на его основе сформировать нужные фазные напряжения и все четыре провода подать на счетчики. Для этого в треугольнике междуфазных вторичных напряжений следует создать искусственный нуль, то есть определить точку пересечения медиан в центре треугольника и принять ее за общее начало векторов фазных напряжений. Получившиеся фазные напряжения будут содержать только прямую и обратную последовательности и не будут содержать нулевой.

Искусственный нуль можно создать из трех одинаковых резисторов, соединив их в симметричную трехлучевую звезду. Добиваться строгого равенства резисторов здесь не нужно, так как небольшая несимметричность в виде 2–3% напряжения нулевой последовательности существенной роли не играет. Задача исследования заключается в выборе размера резисторов и в проверке работоспособности схемы. Необходимо также проверить способность трансформаторов напряжения разных типов сохранять класс точности треугольника междуфазных напряжений при однофазных замыканиях сети на землю.

Вторая исследовательская работа заключается в проверке возможности создания искусственного нуля в центре треугольника междуфазных напряжений в каждом счетчике индивидуально. Вероятно, такая возможность в некоторых счетчиках уже реализована. Такой вывод можно сделать на основании знакомства с руководством по их эксплуатации, где в рекомендуемых для трехпроводных сетей схемах подсоединения счетчиков к трансформаторам напряжения соединение с нулевым проводом то присутствует, то отсутствует. Схема подачи на счетчик напряжения только трех фаз без нулевого провода существенно расширила бы сферу использования уже установленных трансформаторов напряжения.

С использованием трансформаторов тока для учета в трехпроводных сетях 6–10–35 кВ затруднений нет. Установленные в двух фазах, они обеспечивают измерение тока в третьей фазе путем нахождения суммы двух токов с обратным знаком.

ВЫВОДЫ

1. Микропроцессорные счетчики требуют проверки на совместимость с трансформаторами напряжения в сетях 6–10–35 кВ. В сетях 110 кВ и выше совместимость всегда обеспечена.
2. Питание счетчиков от фазных напряжений заземляемых трансформаторов напряжения, контролирующих изоляцию в сетях 6–10–35 кВ, может приводить к потере точности учета при однофазных замыканиях на землю и подвергает счетчики опасности повреждения при феррорезонансе в сети.
3. В сетях 6–10–35 кВ по земляному каналу нулевой последовательности энергия не передается и попытки ее учета не имеют смысла. Поэтому рекомендуется питать счетчики фазными напряжениями, лишенными нулевой последовательности. Можно либо получить их от специально разработанных трансформаторов напряжения, либо попытаться создать искусственный нуль в центре треугольника междуфазных напряжений у существующих трансформаторов или в самих счетчиках индивидуально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бардинский С.И., Соколов В. В. Антирезонансные трансформаторы напряжения. Вариант конструкторского решения // Новости ЭлектроТехники. 2010. № 2.